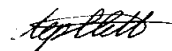


На правах рукописи



ЛЕРНЕР ИЛЬЯ МИХАЙЛОВИЧ

**АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В
УЗКОПОЛОСНЫХ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМАХ ПРИ СКАЧКАХ
ФАЗЫ И АМПЛИТУДЫ ГАРМОНИЧЕСКОГО КОЛЕБАНИЯ**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе
системы и устройства телевидения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань 2012

Диссертационная работа выполнена на кафедре Радиозлектронных и квантовых устройств Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева - КАИ» (КНИТУ-КАИ)

Научный
руководитель

Ильин Герман Иванович
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ, зав. каф. «Радио-
электронных и квантовых устройств» КНИТУ-КАИ

Официальные
оппоненты:

Морозов Олег Геннадьевич
доктор технических наук, профессор,
зав. каф. «Телевидения и мультимедийных систем»
КНИТУ-КАИ

Рябова Наталья Владимировна
доктор физико-математических наук, профессор
зав. каф. «Радиотехники и связи» ПГТУ

Ведущая
организация:

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
университет»

Защита состоится «26» декабря 2012 г. в 14 часов 30 минут в ауд. 1407 Института физики на заседании диссертационного совета Д 212.081.18 при ФГАОУВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке имени Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального университета по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 35.

Автореферат разослан «24» ноября 2012 г. и размещён на официальном сайте Казанского (Приволжского) федерального университета: www.ksu.ru.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 212.081.18
д.ф.-м.н., профессор



Карпов А. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Переходные процессы играют важную роль при работе радиотехнических систем (РТС). Исследованию переходных процессов в линейных системах посвящены работы многих ученых: Д.В. Агеева, П.К. Акулышина, А.Д. Артыма, С.И. Баскакова, Дж. Бернса, Б. Ван-дер-Поля, М.Ф. Гарднера, И.С. Гоноровского, А.М. Данилевского, Г.В. Добровольского, С.И. Евтянова, А.М. Заездного, И.Д. Золотарева, Я.С. Ицхоки, Д. Карсона, Ю.Б. Кобзарева, М.И. Конторовича, К.А. Круга, Ф.В. Лукина, О.Б. Лурье, Л.И. Мандельштама, Л.А. Мееровича, Н.Д. Папалекси, А.С. Розенфельда, А.Н. Щукина, В. Элмора, А.М. Эфроса, М.Ю. Юрьева, Б.И. Яхинсона и др.

Наибольший интерес представляют переходные процессы в узкополосных линейных системах (УЛС), для анализа которых широко используется метод медленно меняющихся амплитуд, развитый С.И. Евтяновым.

В настоящее время широкое применение нашли фазовые РТС, содержащие УЛС, в которых фаза гармонического колебания изменяется скачком на заданную величину в диапазоне от 0° до 360° . К ним относятся системы передачи информации, радиолокации, спутниковой навигации и др. Необходимо отметить, что в последнее время существует тенденция к работе фазовых РТС при переходных процессах. При переходном процессе искажению подвергается как фазовая структура радиосигнала, так и его огибающая, что приводит к межсимвольным искажениям. Поскольку символьная синхронизация осуществляется по огибающей, то стабильность символьной частоты в итоге и определяет вероятность ошибки на 1 бит. На характер переходного процесса оказывает влияние расстройка по частоте гармонического колебания, это приводит к дрожаниям переходов (jitter). Вышесказанное особенно актуально для современных фазовых РТС. Однако, в существующих работах должного внимания исследованию влияния расстройки на переходной процесс данного типа уделено не было. Анализ этих работ показал, что переходные процессы в УЛС исследованы только при значении скачка фазы в диапазоне 0° - 90° и при 180° . Поскольку не учитывалось изменение медленно меняющейся фазы по четвертям комплексной плоскости, что привело к невозможности анализа переходных процессов при значении скачка фазы в диапазоне 90° - 360° , кроме 180° . В связи с этим не были представлены: динамика мгновенной частоты и зависимости временных параметров от фазового скачка. Кроме того, в существующих работах не дано описание переходного процесса в виде квазигармонического колебания с учетом вносимого УЛС фазового сдвига.

В ряде современных фазовых РТС скачки по фазе гармонического колебания сопровождаются одновременным скачками амплитуды. В этом случае анализ переходных процессов в общем виде для УЛС с учетом расстройки по частоте весьма актуален и требует дальнейшего развития метода медленно меняющихся амплитуд. Таким образом, исследование переходных процессов

в УЛС при скачках амплитуды и фазы гармонического колебания и влияние на них расстройки по частоте является актуальным при создании и совершенствовании фазовых РТС.

Предметом исследования являются переходные процессы в УЛС, вызванные скачком амплитуды и фазы гармонического колебания при наличии и отсутствии расстройки по частоте.

Объектом исследования являются УЛС, работающие при переходных процессах, вызванных скачком амплитуды и фазы гармонического колебания

Цель: Исследование переходных процессов в УЛС, вызванных скачком амплитуды и фазы гармонического колебания с учетом расстройки по частоте, направленное на повышение эффективности фазовых РТС.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие частные **задачи**:

1. Провести обзор методов анализа переходных процессов в линейных цепях.
2. Провести анализ переходного процесса в настроенной УЛС, вызванного скачком фазы гармонического колебания, значение которого задается в диапазоне от 0° до 360° или от -180° до $+180^\circ$, с учетом постоянного фазового сдвига, вносимого УЛС, и изменения медленно меняющейся фазы по четвертям комплексной плоскости.
3. Развить метод медленно меняющихся амплитуд для анализа переходного процесса, вызванного одновременным скачком амплитуды и фазы гармонического колебания в УЛС, при расстройке по частоте, позволяющего учесть постоянный фазовый сдвиг, вносимый УЛС, и изменение медленно меняющейся фазы по четвертям комплексной плоскости. Провести анализ общих свойств и особенностей переходного процесса данного типа.
4. Провести верификацию полученных результатов посредством сравнения с результатами математического моделирования. Выработка рекомендации для фазовых РТС, работающих при переходных процессах.

Методы исследования: аппарат теории математического анализа, теории функции комплексной переменной, теории обобщенных функций, метод медленно меняющихся амплитуд, методы спектрального анализа: метод Yule-Walker и быстрое преобразование Фурье; математическое моделирование в среде Matlab-Simulink.

Достоверность и обоснованность результатов является следствием использования корректных математических методов и подтверждается сравнением с результатами математического моделирования переходных процессов с использованием сертифицированных моделей Simulink.

Научная новизна полученных результатов

1. Проведен анализ переходного процесса, вызванного скачком фазы гармонического колебания, значение которого задается в диапазоне от 0° до 360° или от -180° до 180° , в настроенной УЛС с учетом вносимого ею постоянного

фазового сдвига. Впервые получены аналитические выражения, описывающие изменения: 1) огибающей для полосового фильтра к-типа (ПФ); 2) медленно меняющейся фазы по четвертям комплексной плоскости и мгновенной частоты для одиночного колебательного контура (ОКК) и ПФ; 3) времени достижения огибающей своего минимального значения и времени максимума выбега частоты для ОКК; 4) значения максимума выбега частоты в зависимости от значения фазового скачка для ОКК. Выявлены новые свойства переходного процесса: 1) при значениях фазового скачка близких к $\pm 180^\circ$ ход кривых медленно меняющейся фазы изменяется от гиперболического вида к s-образному для ОКК; 2) время максимума выбега частоты при значениях фазового скачка близких или равных $\pm 180^\circ$ приблизительно или полностью совпадает с временем достижения огибающей своего минимального значения, а для остальных значений фазового скачка оно уменьшается для ОКК и увеличивается для ПФ; в момент начала переходного процесса наблюдается скачок у мгновенной частоты для ОКК; 3) достижение стационарного значения у огибающей, медленно меняющейся фазы и мгновенной частоты сопровождается затухающими колебаниями для ПФ.

2. Разработан метод анализа переходного процесса, вызванного одновременным скачком амплитуды и фазы (в диапазоне от -180° до 180°) гармонического колебания в УЛС, представляющий его в виде квазигармонического колебания, с учетом расстройки по частоте и вносимого УЛС фазового сдвига. Впервые получены аналитические выражения: 1) описывающие изменения огибающей, медленно меняющейся фазы по четвертям комплексной плоскости и мгновенной частоты с учетом расстройки; 2) позволяющие определить время достижения огибающей своего минимального значения в зависимости от соотношения амплитуд и значения фазового скачка, и значение огибающей в этот момент при отсутствии расстройки по частоте; 3) определяющие значения фазовых скачков, при которых характер изменения огибающей плавный без провала по амплитуде при заданном соотношении амплитуд. Выявлены новые общие свойства переходного процесса: 1) соотношение знаков фазового скачка и расстройки по частоте определяет характер изменения огибающей и медленно меняющейся фазы: различие знаков приводит к менее выраженному провалу по амплитуде у огибающей и более плавному характеру поведения медленно меняющейся фазы по сравнению со случаем, когда знаки совпадают; 2) при значениях фазового скачка $\pm 180^\circ$ при положительной и отрицательной расстройках по частоте наблюдается полное совпадение огибающих, а медленно меняющиеся фазы имеют одинаковый характер поведения, но противоположное направление хода кривых; 3) длительность переходного процесса зависит от соотношения амплитуд.

3. Выявлены особенности спектров сигнала с относительно фазовой телеграфией (ОФТ-сигнал) и стабильности его символьной частоты на выходе ОКК

при длительности импульса меньше длительности переходного процесса. Разработаны способы формирования ОФТ-сигнала на базе сигнала биений и однотонового амплитудно-модулированного колебания (АМ-сигнала), обеспечивающие более эффективное использование радиочастотного ресурса и высокую стабильность символьной частоты по сравнению с ОФТ-сигналом.

Практическая ценность

1. Аналитические выражения, выявленные свойства и особенности переходных процессов в УЛС, вызванных скачком фазы и амплитуды, с учетом расстройки по частоте позволят учесть влияние переходных процессов при совершенствовании фазовых РТС.
2. Представлен способ формирования ОФТ-сигнала с гладкой огибающей на базе сигнала биений, обеспечивающий высокую стабильность символьной частоты и более эффективное использование радиочастотного ресурса по сравнению с ОФТ-сигналом с прямоугольной огибающей.

Реализация результатов работы. Основные результаты исследований использовались при выполнении аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)" (гос. рег. №01201162686, инв. №02201256616), гос. задания Минобрнауки (гос. рег. №01201259881) и в учебном процессе ФГБОУ ВПО «КНИТУ-КАИ» при подготовке студентов по специальности 210400 «Радиотехника».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Международных молодежных НК XVI и XIX "Туполевские чтения" (Казань, 2008 г., 2011 г.), молодежной НК III "Тинчуриновские чтения" (Казань, 2008 г.), Международной НТК "Проблемы техники и технологий телекоммуникаций" ПТиТТ – 2008 (Казань, 2008 г.), I - III международных молодежных НК «Гражданская авиация: XXI век» (Ульяновск, 2009-2011 гг.), VIII и IX Международных НТК «Физика и технические приложения волновых процессов» (С-Петербург, 2009 г., Челябинск, 2010 г.), 6-ой Всероссийской НПК «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем» (Ульяновск, 2009 г.), 6-ой Международной молодежной НТК Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ – 2010» (Севастополь, 2010 г.), XVIII Российской НК профессорско-преподавательского состава научных сотрудников и аспирантов (Самара, 2011 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 печатных работы, в том числе 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 3 статьи в журналах, входящих в международную систему цитирования SCOPUS.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты анализа переходного процесса, вызванного скачком фазы гармонического колебания, значение которого задается в диапазоне от 0° до 360° или от -180° до 180° в настроенной УЛС, с учетом вносимого ею постоянного фазового сдвига. Аналитические выражения, описывающие поведе-

ния огибающей, медленно меняющейся фазы, мгновенной частоты для ОКК и ПФ и определяющие временные параметры переходного процесса для ОКК. Свойства, характеризующие особенности изменение огибающей, медленно меняющейся фазы, мгновенной частоты и временных параметров переходного процесса для ОКК и ПФ. Особенности прохождения импульса фазы и фазоманипулированных сигналов через ОКК.

2. Метод анализа переходного процесса, вызванного одновременным скачком амплитуды и фазы гармонического колебания в УЛС, представляющий его в виде квазигармонического колебания, с учетом расстройки по частоте и вносимого УЛС фазового сдвига. Аналитические выражения, позволяющие определить временные параметры и характер изменения огибающей, медленно меняющейся фазы по четвертям комплексной плоскости, мгновенной частоты при наличии и отсутствии расстройки по частоте в зависимости от значений фазового скачка и соотношения амплитуд. Общие свойства переходного процесса при отсутствии и наличии расстройки по частоте, характеризующие поведение огибающей, медленно меняющейся фазы в зависимости от соотношения знаков расстройки и фазового скачка, и соотношения амплитуд.

3. Результаты верификации полученных результатов. Оценка стабильности символьной частоты и спектров ОФТ-сигнала, прошедшего через ОКК, при длительности импульса меньше длительности переходного процесса, вызванного скачком фазы. Способы формирования ОФТ-сигнала с гладкими огибающими, обеспечивающие более эффективное использование радиочастотного ресурса и высокую стабильность символьной частоты.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация изложена на 173 странице; состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, 6 приложений. Общий объем: 231 страниц, 2 таблицы, 81 рисунков.

Автор выражает искреннюю благодарность профессору, д.т.н. Г.И. Ильину, и доценту, д.ф.-м.н. С.М. Чернявскому за консультации и советы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор методов анализ переходных процессов в линейных цепях. Показано, что широкое распространение получили фазовые РТС, содержащие УЛС, в которых производится скачок фазы гармонического колебания. В ряде этих РТС скачок фазы сопровождается скачком амплитуды. При этом существует тенденция к работе фазовых РТС при переходных процессах. Обзор существующих работ по исследованию переходных процессов в УЛС при скачках фазы показал, что оно проведен не полно. Анализ переходных процессов в УЛС проведен только при значении скачка фазы в

диапазоне $0^\circ - 90^\circ$ и при 180° , поскольку не было учтено изменение медленно меняющейся фазы по четвертям комплексной плоскости, это привело к невозможности анализа переходных процессов при значении скачка фазы в диапазоне $90^\circ - 360^\circ$, кроме 180° , что актуально для современных фазовых РТС. В существующих работах не проводился в общем виде анализ переходных процессов в УЛС при скачке амплитуды и фазы с учетом расстройки. В конце главы обоснована цель и сформулированы задачи для её достижения.

Вторая глава посвящена анализу переходного процесса, вызванного скачком фазы гармонического колебания в настроенной УЛС, на основе метода медленно меняющихся амплитуд. Постановка задачи: к моменту переключения фазы УЛС находится в стационарном режиме, на входе действует гармоническое колебание $\exp(j(\omega_0 t + a))$ с единичной амплитудой и фазой a . В момент времени $t=0$ фаза скачком изменяется до значения b . Амплитуда и частота входного сигнала поддерживаются постоянными в течении всего переходного процесса, а частота сигнала ω_0 равна резонансной или среднегеометрической частоте ω_p , УЛС - высокочастотная ($Q > 10$)).

Согласно принципу суперпозиции, скачок фазы заменяется дополнительным включением к колебанию $\exp(j(\omega_0 t + a))$ еще двух $-\exp(j(\omega_0 t + a))$ и $+\exp(j(\omega_0 t + b))$. Результирующее колебание $\square(t)\exp(j(\omega_0 t + \xi_{ном}))$ на выходе УЛС определяется следующим образом:

$$\mathcal{H}(t)\exp(j(\omega_0 t + \xi_{ном})) = \exp(j(\omega_0 t)) \left[(\mathcal{K}(0) - \mathcal{B}(t))\exp(ja) + \mathcal{B}(t)\exp(jb) \right], \quad (1)$$

где $\mathcal{K}(0) = k(0)\exp(j\xi_{ном})$ - коэффициент передачи настроенной УЛС; $k(0)$ - модуль коэффициента передачи $k(0) = 1$; $\xi_{ном} = -(\pi/2)n$ - фазовый сдвиг, вносимый УЛС, n -число звеньев, вносящих сдвиг фазы $-\pi/2$; $\mathcal{B}(t) = \mathcal{K}(0)B_0(t)$ - огибающая отклика УЛС на радиоскачок, $B_0(t)$ - функция установления.

Решение задачи произведено для двух вариантов: 1) при скачке фазы от 0 до φ (т.е. $a = 0$, $b = \varphi$, $\varphi \in [0, 2\pi]$, на примере ОКК); 2) при скачке фазы от $-\theta$ до $+\theta$, ($a = -\theta$, $b = +\theta$, $-\pi \leq 2\theta \leq \pi$ на примере ПФ, состоящего из r звеньев k типа (рис.1), нагруженного на характеристическое сопротивление). Действительная часть результирующего колебания представляется в виде квазигармонического колебания

$$s_{вых}(t) = H(t) \cos(\omega_0 t + \psi(t) + \xi_{ном}), \quad (2)$$

где $H(t)$ - огибающая, $\psi(t)$ - медленно меняющаяся фаза.

Выражения, описывающие параметры переходного процесса (рис. 2-4, здесь и далее $\Delta\Omega t$ - безразмерное время) в виде квазигармонического колебания для ОКК ($\xi_{ном} = 0$), имеют вид: 1) огибающая переходного процесса

$$H(t) = \sqrt{(1 - \exp(-\Delta\Omega t))^2 + 2\cos(\varphi)(\exp(-\Delta\Omega t) - \exp(-2\Delta\Omega t)) + \exp(-2\Delta\Omega t)}; \quad (3)$$

2) медленно меняющаяся фаза

$$\psi(t) = \begin{cases} \arctg(\operatorname{Im} \tilde{H}(t) / \operatorname{Re} \tilde{H}(t)), \varphi \in [0, \pi/2]; \\ \arctg(\operatorname{Im} \tilde{H}(t) / \operatorname{Re} \tilde{H}(t)) \text{ при } t \leq t_{\text{пер}}, \varphi \in (\pi/2, \pi]; \\ \pi - \arctg(\operatorname{Im} \tilde{H}(t) / \operatorname{Re} \tilde{H}(t)) \text{ при } t > t_{\text{пер}}, \varphi \in (\pi/2, \pi]; \\ -\arctg(\operatorname{Im} \tilde{H}(t) / \operatorname{Re} \tilde{H}(t)) \text{ при } t \leq t_{\text{пер}}, \varphi \in (\pi, 3\pi/2); \\ -\pi + \arctg(\operatorname{Im} \tilde{H}(t) / \operatorname{Re} \tilde{H}(t)) \text{ при } t > t_{\text{пер}}, \varphi \in (\pi, 3\pi/2); \\ -\arctg(\operatorname{Im} \tilde{H}(t) / \operatorname{Re} \tilde{H}(t)), \varphi \in [3\pi/2, 2\pi]; \end{cases} \quad (4)$$

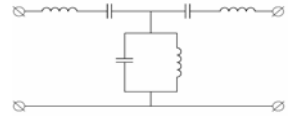


Рис. 1. Звено к-типа полосового фильтра

4) мгновенная частота (где $\delta(t)$ - дельта функция)

$$\omega(t) = \omega_0 + \frac{\Delta\Omega \exp(-\Delta\Omega t) \sin(\varphi)}{1 + 2 \exp(-\Delta\Omega t) (\cos(\varphi) - 1) (1 - \exp(-\Delta\Omega t))} \text{ при } \varphi \in (0^\circ, 180^\circ) \cup (180^\circ, 360^\circ); \quad (5)$$

$$\omega(t) = \omega_0 + \pi\delta(t - t_{\text{пер}}) \text{ при } \varphi = 180^\circ; \quad \omega(t) = \omega_0 - \pi\delta(t - t_{\text{пер}}) \text{ при } \varphi = -180^\circ;$$

где $\operatorname{Im} \tilde{H}(t) = \sin(\varphi)(1 - \exp(-\Delta\Omega t))$, $\operatorname{Re} \tilde{H}(t) = \cos(\varphi)(1 - \exp(-\Delta\Omega t)) + \exp(-\Delta\Omega t)$; $\Delta\Omega$ - половина полосы пропускания; $t_{\text{пер}} = \ln(1 - [\cos(\varphi)]^{-1}) / \Delta\Omega$ - время изменения знака $\operatorname{Re} \tilde{H}(t)$, т.е. время перехода между четвертями медленно меняющейся фазы $\psi(t)$ при $\varphi \in (\pi/2, 3\pi/2)$. При скачке фазы от $360^\circ (0^\circ)$ к 180° (т.е. $\varphi_1 = -\pi$) медленно меняющаяся фаза определяется как $\psi_1(t) = -\psi(t)|_{\varphi=\pi}$, а при определении огибающей значение фазового скачка $\varphi = 360^\circ - 180^\circ = 180^\circ$.

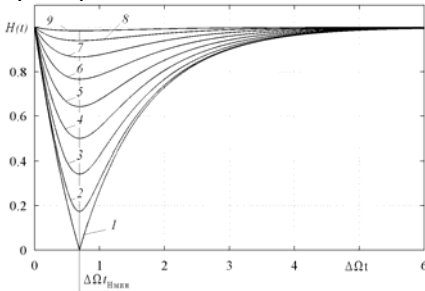


Рис.2. Зависимости изменения огибающей от значения скачка фазы φ , °: 180 (1), 160 (2), 140 (3), 120 (4), 100 (5), 80 (6), 60 (7), 40 (8), 20 (9).

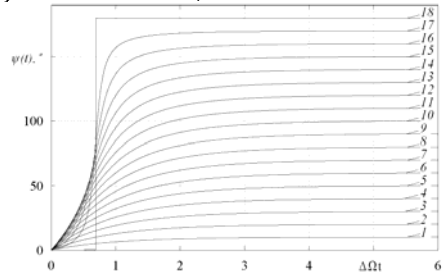


Рис.3. Зависимости изменения медленно меняющейся фазы от значения скачка фазы φ , °: 10 (1), 20 (2), 30 (3), 40 (4), 50 (5), 60 (6), 70 (7), 80 (8), 90 (9), 100 (10), 110 (11), 120 (12), 130 (13), 140 (14), 150 (15), 160 (16), 170 (17), 180 (18)

Из рис. 2 видно, что огибающая в течение переходного процесса достигает своего минимума и возвращается к установившемуся значению. Время $t_{H\text{мин}}$ достижения огибающей своего минимального значения определяется из решения уравнения $dH(t_{H\text{мин}})/dt=0$, которое имеет вид $t_{H\text{мин}} = \ln 2 / \Delta\Omega$ (6).

Из рис. 3 видно, что у медленно меняющейся фазы $\psi(t)$ при значениях фазового скачка $\varphi \in [100^\circ; 170^\circ]$ ход кривых изменяется от гиперболического ви-

да к s-образному при переходе φ от 100° – 140° к 150° – 170° . При $\varphi = 180^\circ$ ход кривой медленно меняющейся фазы имеет ступенчатый вид.

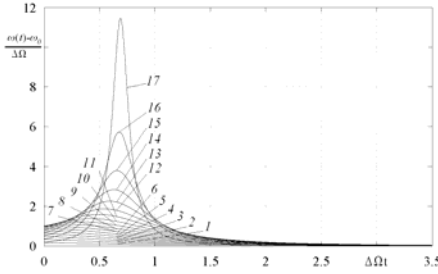


Рис.4. Зависимости изменения мгновенной частоты от значения скачка фазы φ , °: 10 (1), 20 (2), 30 (3), 40 (4), 50 (5), 60 (6), 70 (7), 80 (8), 90 (9), 100 (10), 110 (11), 120 (12), 130 (13), 140 (14), 150 (15), 160 (16), 170 (17).

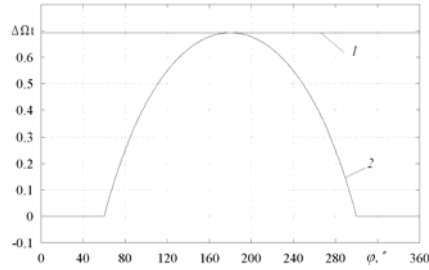


Рис.5. Зависимости $t_{Нмин}$ времени достижения огибающей своего минимума (1) и $t_{\omega_{макс}}$ времени максимума выбега частоты (2) от фазового скачка φ .

Из рис. 4 видно, что 1) в момент начала ($t=0$) переходного процесса наблюдается скачкообразное изменение частоты равное $\Delta\Omega\sin(\varphi)$ относительно частоты ω_0 ; 2) изменение мгновенной частоты имеет плавный характер с наличием максимума выбега частоты с последующим её уменьшением до исходного значения, при переходе фазового скачка от $\varphi \in [10^\circ; 90^\circ]$ к $\varphi \in [100^\circ; 170^\circ]$ максимум выбега частоты становится более выраженным, а кривая изменения мгновенной частоты приобретает колокообразную форму; 3) $t_{\omega_{макс}}$ время максимума выбега частоты возрастает с увеличением значения фазового скачка, а при значениях фазового скачка близких к 180° становится приблизительно постоянным; для $\varphi \in [10^\circ; 60^\circ]$ максимум выбега частоты достигается в момент ($t=0$).

Время максимума выбега частоты определим из решения $d\omega(t_{\omega_{макс}})/dt=0$

$$t_{\omega_{макс}} = \ln\left(2[1 - \cos(\varphi)]\right) / 2\Delta\Omega, \quad (7)$$

из которого следует, что $t_{\omega_{макс}}$ зависит от значения фазового скачка φ и от полосы пропускания $2\Delta\Omega$ (рис.5). При значениях фазового скачка $60^\circ < \varphi < 300^\circ$ время $t_{\omega_{макс}} > 0$. Максимальное значение времени $t_{\omega_{макс}}$ соответствует фазовому скачку $\pm 180^\circ$ и совпадает с временем $t_{Нмин}$, а зависимость $t_{\omega_{макс}}(\varphi)$ симметрична относительно данного значения фазового скачка.

Мгновенная частота в момент времени $t_{\omega_{макс}}$ определяется как

$$\omega(t_{\omega_{макс}}) = \begin{cases} \omega_0 + \frac{\Delta\Omega(2(1-\cos(\varphi)))^{\frac{1}{2}} \sin(\varphi)}{1 + 2(2(1-\cos(\varphi)))^{\frac{1}{2}} (\cos(\varphi) - 1) (1 - (2(1-\cos(\varphi)))^{\frac{1}{2}})} & \text{при } \varphi \in (60^\circ, 180^\circ) \cup (180^\circ, 300^\circ); \\ \omega_0 + \Delta\Omega \sin(\varphi) & \text{при } \varphi \in (0^\circ, 60^\circ] \cup [300^\circ, 360^\circ); \\ \delta\pi & \text{при } \varphi = 180^\circ; -\delta\pi & \text{при } \varphi = -180^\circ. \end{cases} \quad (8)$$

Выражения, описывающие параметры переходного процесса (рис. 6-8) в виде квазигармонического колебания для ПФ ($\zeta_{\text{пост}} = 0$) имеют вид:

$$H(t) = \sqrt{\cos^2(\theta) + \left[1 - 2 \left[1 - \sum_{k=1}^r (J_{2k-2}(\Delta\Omega t) + J_{2k}(\Delta\Omega t))\right]\right]^2} \sin^2(\theta), \quad (9)$$

$$\psi(t) = -\arctg \left[\left[1 - 2 \left[1 - \sum_{k=1}^r (J_{2k-2}(\Delta\Omega t) + J_{2k}(\Delta\Omega t))\right]\right] \tg(\theta) \right], \quad (10)$$

$$\omega(t) = \begin{cases} \omega_0 + \frac{\Delta\Omega \tg(\theta) [J_{2r-1}(\Delta\Omega t) + J_{2r+1}(\Delta\Omega t)]}{1 + \left(\left[1 - 2 \left[1 - \sum_{k=1}^r (J_{2k-2}(\Delta\Omega t) + J_{2k}(\Delta\Omega t))\right]\right] \tg(\theta) \right)^2} & \text{при } -90^\circ < \theta < 90^\circ; \\ \omega_0 \pm \pi \delta(t - t_{\text{Hмин}}) & \text{при } 2\theta = \pm 180^\circ, \text{ где } H(t_{\text{Hмин}}) = 0; \end{cases} \quad (11)$$

где $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$; $J_{2k-2}(\Delta\Omega t)$ и $J_{2k}(\Delta\Omega t)$, $J_{2r-1}(\Delta\Omega t)$, $J_{2r+1}(\Delta\Omega t)$ – функция Бесселя первого рода $2k-2$, $2k$, $2r-1$, $2r+1$ порядка, соответственно; r – число звеньев; ω_0 – среднегеометрическая частота ПФ, $\Delta\Omega$ – половина полосы прозрачности.

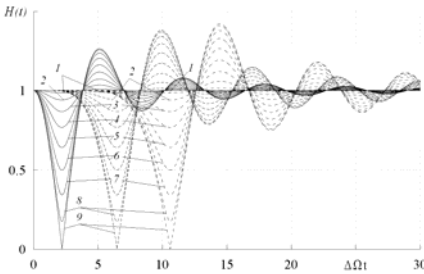


Рис. 6. Зависимости изменения огибающей от значения скачка фазы 2θ и числа звеньев r . $2\theta,^\circ$: 20 (1), 40 (2), 60 (3), 80 (4), 100 (5), 120 (6), 140 (7), 160 (8), 180 (9). Число звеньев r : 1 (—), 3 (---), 5 (— · —)

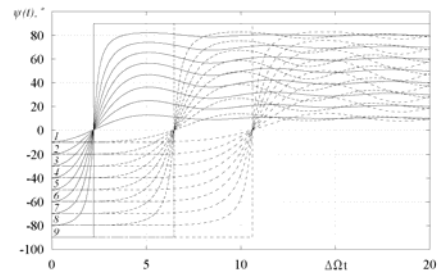


Рис. 7. Зависимости изменения медленно меняющейся фазы от значения скачка фазы 2θ и числа звеньев r . $2\theta,^\circ$: 20 (1), 40 (2), 60 (3), 80 (4), 100 (5), 120 (6), 140 (7), 160 (8), 180 (9). Число звеньев r : 1 (—), 3 (---), 5 (— · —)

Из рис.6 следует, что изменение огибающей $H(t)$ для ПФ аналогично случаю для ОКК. Однако, огибающая $H(t)$ на выходе ПФ, в отличие от огибающей на выходе ОКК достигает установившегося значения при наличии затухающего колебания. Максимальная величина выброса зависит от количества звеньев r в ПФ. Увеличение числа звеньев r приводит к возрастанию $t_{\text{Hмин}}$ времени достижения огибающей своего минимального значения

Из рис.7 следует, что изменение медленно меняющейся фазы $\psi(t)$ носит нелинейный возрастающий характер от исходного $-\theta$ к установившемуся значению $+\theta$ фазы с дальнейшим переходом в затухающий колебательный процесс относительно $+\theta$. Увеличение числа звеньев r приводит к возрастанию задержки переходного процесса.

Из рис.8 следует, что характер изменения мгновенной частоты $\omega(t)$ для ПФ такой же, как у ОКК. Однако, для ПФ в отличие от ОКК установившееся

значение ω_0 достигается при наличии затухающего колебательного процесса. Увеличение числа звеньев r в ПФ приводит к уменьшению значения максимума выбега частоты, увеличению $t_{\omega_{\max}}$ времени максимума выбега частоты, и возрастанию "амплитуды" затухающих колебаний относительно стационарного значения ω_0 .

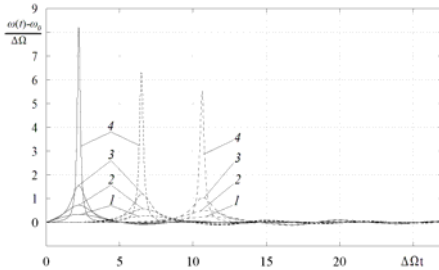


Рис.8. Зависимости изменения мгновенной частоты от значения скачка фазы 2θ и числа звеньев r . 2θ , °: 50 (1), 90 (2), 140 (3), 170 (4). Число звеньев r : 1 (—), 3 (---), 5 (- · - · -)

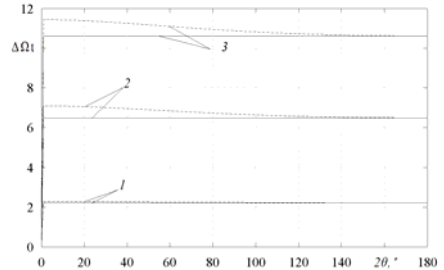


Рис.9. Зависимости $t_{H_{\min}}$ времени достижения огибающей своего минимума (—) и $t_{\omega_{\max}}$ времени максимума выбега частоты (---) от значения фазового скачка 2θ . Число звеньев r : 1 (1), 3 (2), 5 (3).

Из рис. 9 следует, что при $2\theta \in (0^\circ; 180^\circ]$ $t_{H_{\min}}$ постоянно, а $t_{\omega_{\max}}$ уменьшается с увеличением значения фазового скачка и при $2\theta = 180^\circ$ равно $t_{H_{\min}}$. Увеличение числа звеньев r приводит к увеличению разницы между $t_{\omega_{\max}}$ и $t_{H_{\min}}$ при малых значениях фазового скачка 2θ .

На основе полученных результатов далее рассмотрено прохождение импульса фазы через настроенный ОКК для значений скачка фазы 90° и 180° , при длительности импульса фазы больше длительности переходного процесса при скачке фазы. Импульс фазы - это импульс, образованный двумя скачками фаз от 0 к φ и от φ к 0 или от $-\theta$ к $+\theta$ и от $+\theta$ к $-\theta$. Из анализа результатов следует, что 1) на выходе ОКК формируется радиоимпульс с частотой гармонического колебания и коэффициентом модуляции равным 1 при скачке фазы 180° и меньшем 1 при 90° ; 2) длительность радиоимпульса равна длительности импульса фазы; 3) задержка радиоимпульса не зависит от значения скачка фазы и равна $t_{H_{\min}}$ (6); 4) задний фронт радиоимпульса короче переднего.

Далее рассмотрено прохождение ОФТ-сигнала, модулированного псевдослучайной последовательностью (ПСП), через ОКК при длительностях импульса 2τ и 4τ , где τ – постоянная времени ОКК. Показано, что при длительности импульсов существенно меньше длительности переходного процесса, вызванного скачком фазы, импульсы на выходе ОКК имеют форму подобную треугольной (на примере 2τ), а их амплитуды изменяются в зависимости от передаваемых в ПСП комбинаций "0" и "1", как и время сдвига передаваемой последовательности, определяемое как время достижения огибающей своего

минимального значения. Для комбинаций из двух и более “1” время сдвига передаваемой последовательности постоянно; для комбинаций с различным чередованием между собой “0” и “1” время сдвига нестабильно, что приводит к нестабильности символьной частоты, определяемой по огибающей. Увеличение числа комбинаций из “0” в ПСП, следующих друг за другом, делает выделение символьной частоты затруднительным.

Третья глава посвящена разработке метода анализа переходного процесса, вызванного одновременным скачком амплитуды и фазы гармонического колебания на входе УЛС, при наличии и отсутствии расстройки по частоте на основе метода медленно меняющихся амплитуд, и анализу его общих свойств и особенностей.

Постановка задачи: к моменту переключения УЛС находится в стационарном режиме, на входе действует гармоническое колебание $M_1 \exp[j((\omega_0 \pm \Delta\omega)t - \theta + \xi_{\text{пост}})]$ с амплитудой M_1 , фазой $(-\theta)$ и расстройкой по частоте $\Delta\omega$, принимающей как положительные $(+\Delta\omega)$, так и отрицательные $(-\Delta\omega)$ значения относительно среднегеометрической (резонансной) частоты УЛС ω_0 , с фазовым сдвигом $\xi_{\text{пост}}$. В момент времени $t=0$ одновременно скачком изменяют фазу на 2θ и амплитуду гармонического колебания от M_1 до M_2 . При этом частота входного сигнала поддерживается постоянной, а УЛС высокодобротная ($Q>10$). В результате на выходе УЛС будет наблюдаться переходной процесс, результирующее колебание, которого примет вид¹

$$\begin{aligned} & \mathcal{K}_{\pm}(t) \exp\left(j\left([\omega_0 \pm \Delta\omega]t \pm \varphi(\Delta\omega) + \xi_{\text{пост}}\right)\right) = \exp\left(j\left([\omega_0 \pm \Delta\omega]t + \xi_{\text{пост}}\right)\right) \times \\ & \times \left[M_1 \left(\mathcal{K}_{\pm}(j\Delta\omega) - \mathcal{B}_{\pm}(j\Delta\omega, t) \right) \exp(-j\theta) + M_2 \mathcal{B}_{\pm}(j\Delta\omega, t) \exp(+j\theta) \right], \end{aligned} \quad (12)$$

где $\mathcal{B}_{\pm}(j\Delta\omega, t) = \mathcal{K}_{\pm}(j\Delta\omega) \mathcal{B}_0^{\pm}(j\Delta\omega, t)$ - огибающая отклика УЛС при расстройке по частоте на единичный радиоскачок; $\mathcal{K}_{\pm}(j\Delta\omega) = k(\Delta\omega) \exp(j\varphi(\Delta\omega))$ - коэффициент передачи УЛС при расстройке по частоте, $k(\Delta\omega)$ - его модуль, $\varphi(\Delta\omega)$ - вносимый УЛС фазовый сдвиг. Для высокодобротных УЛС: $k(-\Delta\omega) = k(\Delta\omega)$ и $\varphi(-\Delta\omega) = -\varphi(\Delta\omega)$. Выражения, определяющие свойства функции установления $\mathcal{B}_0^{\pm}(j\Delta\omega, t)$ имеют вид

$$\left. \begin{aligned} & \mathcal{B}_0^{\pm}(j\Delta\omega, t) = \operatorname{Re} \mathcal{B}_0^{\pm}(j\Delta\omega, t) + j \operatorname{Im} \mathcal{B}_0^{\pm}(j\Delta\omega, t) \\ & \operatorname{Re} \mathcal{B}_0^{\pm}(-j\Delta\omega, t) = \operatorname{Re} \mathcal{B}_0^{\pm}(j\Delta\omega, t); \operatorname{Im} \mathcal{B}_0^{\pm}(-j\Delta\omega, t) = -\operatorname{Im} \mathcal{B}_0^{\pm}(j\Delta\omega, t) \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} & \operatorname{Re} \mathcal{B}_0^{\pm}(j\Delta\omega, t) = (\omega_0 / 2) \int_0^t (A(\tau) / k(\Delta\omega)) \cos[\Delta\omega\tau + \varphi_1(\Delta\omega)] d\tau \\ & \operatorname{Im} \mathcal{B}_0^{\pm}(j\Delta\omega, t) = -(\omega_0 / 2) \int_0^t (A(\tau) / k(\Delta\omega)) \sin[\Delta\omega\tau + \varphi_1(\Delta\omega)] d\tau \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

¹ Здесь и далее: верхний знак в индексе и в выражениях соответствует положительной $(+\Delta\omega)$, а нижний - отрицательной расстройке по частоте $(-\Delta\omega)$

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Re} \mathcal{B}_0^k(j\Delta\omega, 0) = 0, \operatorname{Im} \mathcal{B}_0^k(j\Delta\omega, 0) = 0; \text{ в момент } t = 0 \\ \operatorname{Re} \mathcal{B}_0^k(j\Delta\omega, \infty) = 1, \operatorname{Im} \mathcal{B}_0^k(j\Delta\omega, \infty) = 0; \text{ в конце процесса } (t = \infty) \\ \text{при } \Delta\omega = 0, \operatorname{Re} \mathcal{B}_0^k(0, t) = B_0(t), \operatorname{Im} \mathcal{B}_0^k(0, t) = 0, k(0) = 1 \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

где $\varphi_1(\Delta\omega) = \varphi(\Delta\omega) + (\pi/2)n$, n - число звеньев, вносящих фазовый сдвиг $-\pi/2$ (при этом $\pm \varphi(\Delta\omega) = \pm \varphi_1(\Delta\omega) - (\pi/2)n$); $A(\tau)$ - огибающая отклика на единичное ступенчатое воздействие без учета возможного множителя $(-j)^n$.

Действительная часть результирующего колебания представляется в виде квазигармонического колебания

$$s_{\text{вых}}(t) = H_{\pm}(t) \cos((\omega_0 \pm \Delta\omega)t + \psi_{\pm}(t) \pm \varphi(\Delta\omega) + \xi_{\text{ном}}). \quad (16)$$

Параметры квазигармонического колебания с учетом (12)-(14), следующие:
1) огибающая переходного процесса

$$\begin{aligned} H_{\pm}(t) = k(\Delta\omega) M_1 \left[(1 - 2 \operatorname{Re} \mathcal{B}_0^k(j\Delta\omega, t)) + (1 + z^2 - 2z \cos(2\theta)) (B_0(\Delta\omega, t))^2 + \right. \\ \left. + 2z (\operatorname{Re} \mathcal{B}_0^k(j\Delta\omega, t) \cos(2\theta) \operatorname{Im} \mathcal{B}_0^k(j\Delta\omega, t) \sin(2\theta)) \right]^{1/2}, \end{aligned} \quad (17)$$

где $z = M_2 / M_1$, $B_0(\Delta\omega, t) = \sqrt{(\operatorname{Re} \mathcal{B}_0^k(j\Delta\omega, t))^2 + (\operatorname{Im} \mathcal{B}_0^k(j\Delta\omega, t))^2}$.

2) медленно меняющаяся фаза, с учетом (19):

$$\psi_{\pm}(t) = \begin{cases} \arctg(\operatorname{Im} \mathcal{H}_{0\pm}^k(t) / \operatorname{Re} \mathcal{H}_{0\pm}^k(t)), & \text{при } \operatorname{Re} \mathcal{H}_{0\pm}^k(t) \geq 0, \operatorname{Im} \mathcal{H}_{0\pm}^k(t) \geq 0, \operatorname{Im} \mathcal{H}_{0\pm}^k(t) < 0; \\ \pi - \arctg(\operatorname{Im} \mathcal{H}_{0\pm}^k(t) / |\operatorname{Re} \mathcal{H}_{0\pm}^k(t)|), & \text{при } \operatorname{Re} \mathcal{H}_{0\pm}^k(t) < 0, \operatorname{Im} \mathcal{H}_{0\pm}^k(t) \geq 0; \\ -\pi + \arctg(\operatorname{Im} \mathcal{H}_{0\pm}^k(t) / \operatorname{Re} \mathcal{H}_{0\pm}^k(t)), & \text{при } \operatorname{Re} \mathcal{H}_{0\pm}^k(t) < 0, \operatorname{Im} \mathcal{H}_{0\pm}^k(t) < 0; \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im} \mathcal{H}_{0\pm}^k(t) = -M_1 \sin(\theta) + (M_2 + M_1) \operatorname{Re} \mathcal{B}_0^k(j\Delta\omega, t) \sin(\theta) \pm (M_2 - M_1) \operatorname{Im} \mathcal{B}_0^k(j\Delta\omega, t) \cos(\theta), \\ \operatorname{Re} \mathcal{H}_{0\pm}^k(t) = M_1 \cos(\theta) + (M_2 - M_1) \operatorname{Re} \mathcal{B}_0^k(j\Delta\omega, t) \cos(\theta) \mp (M_2 + M_1) \operatorname{Im} \mathcal{B}_0^k(j\Delta\omega, t) \sin(\theta) \end{aligned} \quad (19)$$

3) мгновенная частота (с учетом $\nu = \Delta\omega t + \varphi_1(\Delta\omega)$ и $H_{0\pm}(t) = H_{\pm}(t)/k(\Delta\omega)$)

$$\begin{aligned} \omega_{\pm}(t) = \omega_0 \pm \Delta\omega + \frac{1}{H_{0\pm}^2(t)} \frac{\omega_0}{2} \frac{A(t)}{k(\Delta\omega)} \left[m \left[\operatorname{Im} \mathcal{B}_0^k(j\Delta\omega, t) \cos(\nu) + \operatorname{Re} \mathcal{B}_0^k(j\Delta\omega, t) \sin(\nu) \right] \times \right. \\ \left. \times (M_1^2 + M_2^2 - 2M_1 M_2 \cos(2\theta)) + M_1 (M_2 \sin(2\theta m\nu) \pm M_1 \sin(\nu)) \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

Анализ выражений (17)-(19) выявил следующие свойства и особенности переходного процесса, вызванного одновременным скачком амплитуды и фазы гармонического колебания (проиллюстрированы на примере ОКК рис.10-14):

1. При различии знаков фазового скачка и расстройки по частоте у огибающей провал по амплитуде менее выражен, а характер изменения медленно меняющейся фазы более плавный по сравнению со случаем, когда знаки этих параметров совпадают; за исключением $2\theta = \pm 180^\circ$, когда наблюдается полное совпадение огибающих, а характер поведения медленно меняющихся фаз одинаков, но ход кривых имеет противоположное направление (рис.10-13).

2. При отсутствии расстройки время $t_{\text{Hмин}}$ возрастает с увеличением $|2\theta|$ при

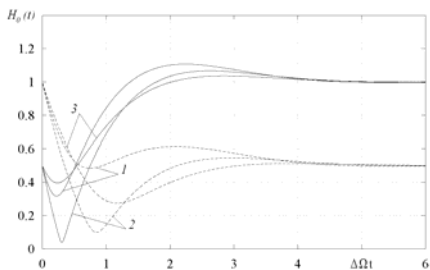


Рис.10 Зависимости огибающей при совпадении знака фазового скачка и расстройки $\Delta\omega/\Delta\Omega=1$, $2\theta,^\circ$: 180 (1), 120 (2), 60 (3), $M_1=0,5$ $M_2=1$ (—), $M_1=1$ $M_2=0,5$ (---).

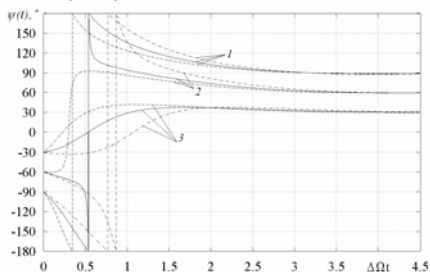


Рис.12. Зависимости медленно меняющейся фазы при совпадении знака фазового скачка и расстройки $\Delta\omega/\Delta\Omega=1$, $2\theta,^\circ$: 180 (1), 120(2), 60(3), $M_1=M_2=1$ (—), $M_1=0,5$ $M_2=1$ (---), $M_1=1$ $M_2=0,5$ (- · - ·).

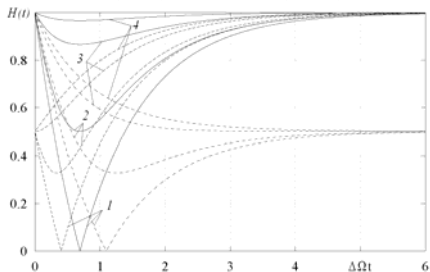


Рис.14. Зависимости огибающей, расстройка отсутствует. $2\theta,^\circ$: 180 (1), 120 (2), 60 (3), 30 (4), $M_1=M_2=1$ (—), $M_1=0,5$ $M_2=1$ (---), $M_1=1$ $M_2=0,5$ (- · - ·).

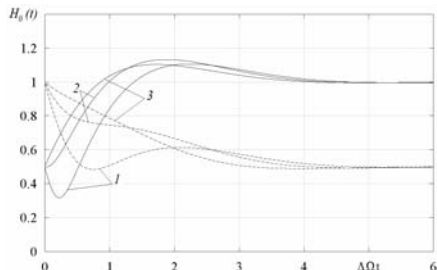


Рис.11. Зависимости огибающей при различии знака фазового скачка и расстройки $\Delta\omega/\Delta\Omega = -1$, $2\theta,^\circ$: 180 (1), 120 (2), 60 (3), $M_1=0,5$ $M_2=1$ (—), $M_1=1$ $M_2=0,5$ (---).

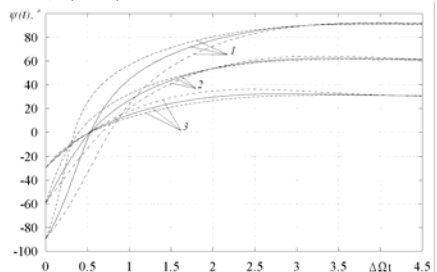


Рис.13. Зависимости медленно меняющейся фазы при различии знака фазового скачка и расстройки $\Delta\omega/\Delta\Omega=-1$, $2\theta,^\circ$: 180 (1), 120(2), 60(3), $M_1=M_2=1$ (—), $M_1=0,5$ $M_2=1$ (---), $M_1=1$ $M_2=0,5$ (- · - ·).

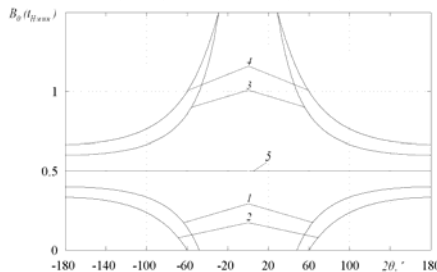


Рис. 15. Зависимости функции установления $B_0(t_{Hmin})$ от фазового скачка 2θ , при которых огибающая достигает минимального значения, в отсутствие расстройки. z : 1,5 (1), 2 (2), 2/3 (3), 0,5 (4), 1/5 (5)

$M_2 > M_1$ и уменьшается при $M_1 > M_2$, по сравнению со случаем $M_1 = M_2$, когда t_{Hmin} постоянно (рис. 15). Условие, при котором огибающая достигает своего минимального значения
$$\frac{1 - z \cos(2\theta)}{1 + z^2 - 2z \cos(2\theta)} = B_0(t_{Hmin}), \quad (21)$$

этом определяется как $H_{min} = M_1 \sqrt{1 - (1 - z \cos(2\theta))^2 / (1 + z^2 - 2z \cos(2\theta))}. \quad (22)$

3. Длительность переходного процесса сокращается, если соотношение амплитуд $M_2 > M_1$ и увеличивается, если $M_1 > M_2$ относительно случая $M_1 = M_2$.

4. При отсутствии расстройки изменение огибающей носит плавный характер без провала по амплитуде для $z > 1$ ($M_2 > M_1$) и значениях фазового скачка, удовлетворяющих условию $|2\theta| < \arccos(1/z)$ (23), а для $z < 1$ ($M_1 > M_2$), когда удовлетворяется условие $|2\theta| < \arccos((B_{\max}(1+z^2)-1)/(z(2B_{\max}-1)))$ (24) (см. рис.14), где B_{\max} - наибольшее значение функции установления для УЛС. В случае, когда (23) и (24) становятся равенствами значения фазовых скачков являются критическими и при $z > 1$ огибающая нарастает с некоторой задержкой, поскольку $t_{\min} = 0$, а при $z < 1$ наблюдается более резкий ход огибающей по сравнению со случаем (24).

Четвертая глава посвящена верификации полученных результатов посредством математического моделирования; исследованию особенностей спектров и стабильности символьной частоты фазоманипулированных сигналов при длительности импульса меньше длительности переходного процесса, вызванного скачком фазы на входе УЛС, на примере ОФТ-сигнала, прошедшего через ОКК; разработке способов повышения стабильности символьной частоты фазоманипулированных сигналов на примере ОФТ-сигнала.

Проверка метода осуществлялась в среде моделирования Matlab – Simulink, в качестве УЛС использовался ОКК, с 1) добротностью $Q=15$, резонансной частотой $f_0 = 1$ кГц, и 2) с $Q=25$ и $f_0=2,441$ ГГц. Переходной процесс был вызван одновременным скачком амплитуды (от $M_1 = 0,5$ до $M_2 = 1$ и от $M_1 = 1$ до $M_2 = 0,5$) и фазы (на 90° и 180°) при расстройке для 1-го случая $\Delta f = \pm 20$ Гц и для 2-го $\Delta f = \pm 40$ МГц. Сравнительный анализ результатов моделирования и полученных с помощью разработанного метода показал, что их расхождение составляет около 1 % и 0.6% для 1-го и 2-го случая, соответственно.

Далее представлен спектральный анализ и исследование стабильности символьной частоты ОФТ-сигнала, прошедшего через ОКК, в зависимости от вероятности появления “1” и “0” в модулирующей ПСП при длительности импульса 2τ (τ - постоянная времени ОКК). Из результатов анализа следует, что спектр данного сигнала существенно зависит от вероятности появления нулей и единиц в ПСП. Если вероятность появления нулей $P_0 = 1$ и единиц $P_1 = 0$, то спектр соответствует гармоническому колебанию. Увеличение вероятности P_1 приводит к расширению спектра. При $P_1 = P_0 = 0.5$ в ПСП спектр выходного процесса подобен амплитудно-частотной характеристике колебательного контура. Если для $P_1 = 0.6$ спектр подобен амплитудно-модулированному колебанию, то дальнейшее увеличение P_1 приводит к подавлению частот вблизи резонансной частоты колебательного контура, а когда $P_1 = 1$ $P_0 = 0$, то он подобен спектру сигнала биений.

Исследование стабильности символьной частоты проводилось на базе спектрального анализа огибающей выходного процесса для двух добротностей ОКК $Q = 10$ и 20 . Моделирование схемы исследования производилось в системе Simulink с последующей обработкой результатов в Matlab, построение спектральной плотности мощности (СПМ) огибающей осуществлялось с помощью метода Yule-Walker. Результаты исследований приведены в виде зависимостей на рис. 16 и 17, из которых следует, что нестабильность возрастает с увеличением добротности ОКК и уменьшается с увеличением P_1 в ПСП.

Т.о. возникает вопрос о способах увеличения стабильности их символьной частоты при изменении в широких пределах P_1 и P_0 .

Согласно результатам 2-ой главы, при длительности импульсов ОФТ-сигнала меньше длительности переходного процесса при скачке фазы, их форма на выходе ОКК подобна треугольной. Поэтому возникает вопрос о применении гладких огибающих при формировании фазоманипулированных сигналов.

В работе представлены два способа формирования ОФТ-сигналов с гладкими огибающими и анализ их спектральных особенностей: 1) на базе сигнала биений; тогда сформированный сигнал описывается как

$$S_{\text{сформ}}(t) = 2\cos((\omega_1 - \omega_2)t/2 + \varphi)\cos((\omega_1 + \omega_2)t/2), \quad (25)$$

где ω_1 и ω_2 - близкие частоты опорных гармонических колебаний; $\omega_0 = (\omega_1 + \omega_2)/2$ - несущая частота; символьная частота $\omega_\Omega = |\omega_1 - \omega_2|$. Манипуляция фазы производится в моменты, когда $2\cos((\omega_1 - \omega_2)t/2 + \varphi) = 0$.

2) на базе однотонового амплитудно-модулированного колебания (АМ-сигнала) с коэффициентом модуляции $m = 1$. В этом случае сформированный сигнал, описывается выражением

$$S_{\text{сформ}}(t) = (1 + \cos(\Omega t))\cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (26)$$

где ω_0 - несущая частота, Ω - символьная частота. Манипуляция фазы производится в моменты, когда $(1 + \cos(\Omega t)) = 0$. Для обоих способов $\varphi = \varphi_{\text{пред}} + \pi$,

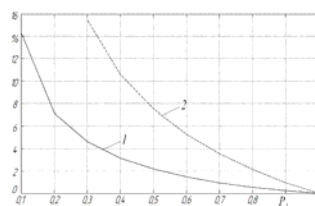


Рис.16 Зависимость нестабильности символьной частоты, от вероятности появления единиц P_1 в ПСП. Добротность ОКК $Q=10$ (1) и $Q=20$ (2)

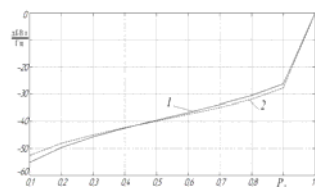


Рис.17 Зависимость нормированного максимального значения СПМ первой гармоники символьной частоты от вероятности появления единиц P_1 в ПСП $Q=10$ (1) и $Q=20$ (2)

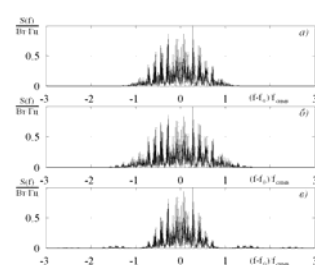


Рис.18 Нормированные спектрограммы для $P_1 = P_0 = 0.5$ в ПСП. ОФТ-сигнал на базе сигнала биений (а), на базе однотонового АМ-сигнала (б), с прямоугольной огибающей (в).

если передаваемый бит информации равен «1» и $\varphi = \varphi_{пред}$, если он равен «0», а $\varphi_{пред}$ – фаза предшествующего импульса.

При анализе ОФТ-сигнала на базе сигнала биений ПСП инвертировалась. Анализ результатов показал, что спектр ОФТ сигнала на базе сигнала биений и на базе однотонового АМ-сигнала имеет подобные формы спектров, существенно зависящие от вероятности появления нулей и единиц в ПСП. Сформированные т.о. сигналы более узкополосные по сравнению с ОФТ-сигналом с прямоугольной огибающей, т.к. отсутствуют боковые лепестки, но наиболее узкополосным из них является сигнал, сформированный на базе сигнала биений (рис. 18).

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные выводы по работе сформулированы в виде следующих положений

1. Проведен анализ переходного процесса, вызванного скачком фазы гармонического колебания, значение которого задается в диапазоне от 0° до 360° или от -180° до $+180^\circ$, в настроенной УЛС с учетом вносимого ею постоянно-го фазового сдвига. Получены аналитические выражения, описывающие поведение огибающей, медленно меняющейся фазы по четвертям комплексной плоскости, мгновенной частоты для ОКК и ПФ и временных параметров переходного процесса для ОКК. Выявлены свойства, характеризующие изменение огибающей, медленно меняющейся фазы, мгновенной частоты и временные параметры переходного процесса, вызванного скачком фазы гармонического колебания в настроенном ОКК и ПФ. Показано, что при воздействии на входе настроенного ОКК импульса фазы формируется радиоимпульс с частотой гармонического колебания и коэффициентом модуляции равным 1 при скачке фазы 180° и меньше 1 при 90° . Длительность радиоимпульса на выходе ОКК равна длительности импульса фазы. Задержка радиоимпульса не зависит от значения скачка фазы и равна $t_{Hmin} = \ln 2 / \Delta\Omega$, а задний фронт радиоимпульса короче переднего.

2. Разработан метод анализа переходного процесса, вызванного одновременным скачком амплитуды и фазы (в диапазоне от -180° до $+180^\circ$), представляющий его в виде квазигармонического колебания, с учетом расстройки по частоте и вносимого УЛС фазового сдвига. Получены аналитические выражения, позволяющие определить временные параметры и характер изменения огибающей, медленно меняющейся фазы по четвертям комплексной плоскости, мгновенной частоты при наличии и отсутствии расстройки по частоте в зависимости от значений фазового скачка и соотношения амплитуд. Выявлены общие свойства переходного процесса, характеризующие поведение огибающей, медленно меняющейся фазы с учетом расстройки по частоте в зависимости от соотношения знаков расстройки и фазового скачка, и соотношения амплитуд.

3. Верификация результатов, полученных с помощью разработанного метода, посредством математического моделирования, показала, что их расхождение составляет около 1 % для $Q=15$ и 0.6% для $Q = 25$. Исследование стабильности символьной частоты ОФТ-сигнала показало, что нестабильность символьной частоты возрастает с увеличением добротности УЛС и уменьшается с увеличением P_1 в ПСП. Предложены способы формирования ОФТ-сигнала с гладкими огибающими, обеспечивающие более эффективное использование радиочастотного ресурса и высокую стабильность символьной частоты по сравнению с ОФТ-сигналом с прямоугольной огибающей.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в центральных журналах, рекомендуемых ВАК РФ

1. **Лернер И.М.** Фазоманипулированный сигнал с использованием амплитудно-модулированной огибающей для передачи частоты тактирования / **И.М. Лернер**, Г.И. Ильин // *Нелинейный мир*, 2010. – Т.8.– №5.– С.321 – 325.
2. **Лернер И.М.** Формирование фазоманипулированного сигнала с помощью переходных процессов при скачкообразном изменении фазы на входе колебательного контура / **И.М. Лернер** // *Нелинейный мир*, 2010. – Т.8.– №6.– С.391 – 398.
3. **Лернер И.М.** Переходные процессы в колебательном контуре при скачкообразных изменениях фазы / **И.М. Лернер**, Г.И. Ильин // *Радиотехника и электроника*, 2010. – Т.55.– №12.– С.1482 – 1487.
4. **Лернер И.М.** Переходные процессы в полосовом фильтре при скачкообразных изменениях фазы / **И.М. Лернер**, Г.И. Ильин, С.М. Чернявский // *Радиотехника и электроника*, 2011. – Т.56.– №3.– С.346 – 351.
5. **Лернер И.М.** Исследование стабильности символьной частоты фазоманипулированного сигнала, сформированного с помощью переходного процесса / **И.М. Лернер**, Г.И. Ильин // *Нелинейный мир*, 2011. – Т.9. – №11.– С.763 – 770.
6. **Лернер И.М.** Анализ переходного процесса, вызванного скачком амплитуды и фазы радиопульса на входе узкополосной линейной системы / **И.М. Лернер**, Г.И. Ильин // *Радиотехника и электроника*, 2012. – Т.57.– №2.– С.192 – 206.

Журналы, входящие в международную систему цитирования SCOPUS

7. **Lerner I.M.** Transient Process in an Oscillatory Circuit Caused by Stepwise Phase Changes / **I.M. Lerner**, G.I. Il'in // *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2010. – Vol. 55.– No. 12. – P. 1385 – 1390.
8. **Lerner I.M.** Transient Processes in a Bandpass Filter Caused by Stepwise Phase Variations / **I.M. Lerner**, G.I. Il'in, S.M. Chernyavskii // *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2011. – Vol.56. – No.3.– P. 320 – 325.
9. **Lerner I.M.** The Analysis of the Transient Process Caused by a Jump in the Amplitude and Phase of Radio Pulse at the Input of Narrowband Linear System / **I.M. Lerner**, G.I. Il'in // *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2012. – Vol.57.– No.2.– P. 174 – 188.

Материалы международных и всероссийских конференций

10. **Лернер И.М.** Особенности спектров сигналов при амплитудно-фазовой модуляции случайным бинарным процессом / **И.М. Лернер**, Г.И. Ильин // *Материалы докладов III молодежной международной научной конференции «Гинчуринские чтения», посвященной 40-летию КГЭУ*. В 4 т.; Казань, 24-25 апреля 2008. – Казань: Изд-во Казан. гос. энерг. ун-та, 2008. – Т. 1.– С.140.
11. **Лернер И.М.** Исследование спектров сигналов при амплитудно-фазовой модуляции случайным бинарным процессом / **И.М. Лернер**, Г.И. Ильин // *XVI Международная молодежная науч-*

- ная конференция «Туполевские чтения». В 4 т.; Казань, 28 – 29 мая 2008 года: труды конференции. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. – Т. 3. – С.277-279.
12. **Лернер И.М.** Особенности прохождения ФМ-сигналов через узкополосные линейные фильтры / **И.М. Лернер**, Г.И. Ильин // 9-ая международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» ПТИТТ-2008. Казань, 25-27 ноября 2008. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. – С.116 – 118.
 13. Ильин Г.И. К анализу прохождения фазоманипулированного сигнала через узкополосный линейный фильтр / Г.И. Ильин **И.М. Лернер** // Гражданская авиация: XXI век: сборник материалов I Международной молодежной научной конференции. Ульяновск, 23-24 апреля 2009. – Ульяновск: Изд-во УВАУ ГА(И), 2009. – С.75-76.
 14. Ильин Г.И. Воздействие ФМ сигнала на узкополосный линейный фильтр / Г.И. Ильин, **И.М. Лернер** // VIII Международная НТК «Физика и технические приложения волновых процессов». Материалы докладов. Санкт-Петербург, 15 – 18 сентября 2009. – СПб: Политехника, 2009. – С.48-50.
 15. **Лернер И.М.** Исследование переходного процесса при скачкообразном изменении фазы на выходе линейного узкополосного фильтра / **И.М. Лернер**, Г.И. Ильин // Труды 6-ой всероссийской НПК (с участием стран СНГ) «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем». Ульяновск, 22-23 сентября 2009. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2009. – С.19-22.
 16. **Лернер И.М.** Прохождение ФМ-сигнала через полосовой фильтр / **И.М. Лернер**, Г.И. Ильин // Гражданская авиация: XXI век: сборник материалов II Международной молодежной НК. Ульяновск, 12-13 апреля 2010. – Ульяновск: Изд-во УВАУ ГА(И), 2010. – С.73-75.
 17. **Лернер И.М.** Исследование переходного процесса при скачкообразном изменении фазы в полосовом фильтре / **И.М. Лернер**, Г.И. Ильин // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ – 2010»: Материалы конференции 6-ой международной молодежной науч.-техн. конф. Севастополь, 19 – 24 апреля 2010. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. – С.496.
 18. **Лернер И.М.** Аналитический расчет переходных процессов на выходе узкополосной системы, вызванных скачкообразным изменением фазы, при расстройке / **И.М. Лернер**, Г.И. Ильин // IX Международной НТК «Физика и технические приложения волновых процессов». Материалы докладов. Челябинск, 15 – 18 сентября 2010. – Челябинск: Изд-во ЧЕЛГУ, 2010. – С.81-82.
 19. **Лернер И.М.** Метод расчета переходного процесса, вызванного прохождением ФМ-п-сигнала через узкополосную линейную систему при расстройке / **И.М. Лернер**, Г.И. Ильин // Гражданская авиация: XXI век: сборник материалов III Международной молодежной научной конференции. Ульяновск, 12-13 апреля 2011. – Ульяновск: Изд-во УВАУ ГА(И), 2011. – С.55-56.
 20. **Лернер И.М.** Аналитический метод расчета переходного процесса во временной области на выходе узкополосной линейной системы, вызванного скачкообразным изменением фазы высокочастотного заполнения на её входе / **И.М. Лернер**, Г.И. Ильин // XVIII Российская НК профессорско-преподавательского состава научных сотрудников и аспирантов: материалы конференции. Самара, 31 января – 4 февраля 2011. – Самара: Изд-во ПГУТИ, 2011. – С. 111 – 112.
 21. **Лернер И.М.** Аналитический метод расчета переходного процесса на выходе узкополосной линейной системы при воздействии АФМ-п-сигнала / **И.М. Лернер**, Г.И. Ильин // XIX Международная молодежная научная конференция «Туполевские чтения». В 4 т.; Казань, 24 – 26 мая 2011: труды конференции. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2011. – Т. 4. – С.54-56.
 22. **Лернер И.М.** Переходной процесс, вызванный прохождением АФМ-п-сигнала через колебательный контур / **И.М. Лернер**, Г.И. Ильин // XIX Международная молодежная научная конференция «Туполевские чтения». В 4 т.; Казань, 24 – 26 мая 2011: труды конференции. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2011. – Т. 4. – С.59-62.